



煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书 · 卷九

宋 岩 张新民 主编

○ 胡爱梅 陈东等编著

煤层气开采 基础理论



科学出版社
www.sciencep.com

煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书·卷九

宋 岩 张新民 主编

煤层气开采基础理论

胡爱梅 陈 东 等编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要针对我国沁水盆地的煤层气开发地质特征,从煤层气吸附/解吸动力学特征、渗流特性、数学模型和数值模拟技术应用方面,系统开展了煤层气吸附/解吸、渗流机理的物理模拟分析研究,在此基础上,建立了符合我国高煤阶煤储层特征的煤层气藏气-水两相耦合流动数学模型,开发了相应的数值模拟软件,并进一步开展了数值模拟软件在沁水盆地煤层气勘探开发中的应用研究,为沁水盆地煤层气高效开发提供了可靠的理论和方法。本书数据资料翔实、内容丰富,具有很强的科学性、创新性和实用性。

本书适合煤层气研究人员和相关专业人员阅读,也可作为高等院校相关专业的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气开采基础理论/胡爱梅,陈东等编著. —北京:科学出版社,2015.1
(煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书;9/宋岩 张新民主编)
ISBN 978-7-03-043267-4

I. ①煤… II. ①胡… ②陈… III. ①煤层-地下气化煤气-地下开采
IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 024556 号

责任编辑:胡晓春/责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:338 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《煤层气开采基础理论》

编委及作者名单

主 任 胡爱梅 陈 东
编 委 张遂安 张先敏 彭宏钊
著 者 (以姓氏笔画为序)

马东民	邓英尔	同登科	孙英男	孙晗森
李少华	李明宅	吴雪飞	张先敏	张遂安
陈 东	周荣福	胡爱梅	姜 林	郭广山
彭宏钊	霍永忠			

序 一

国家 973 计划煤层气项目,将出版《煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书》(共 11 卷),内容包括煤层气基础研究现状、煤层气的生成与储集、煤层气成藏机制及富集规律、中国煤层气资源潜力、煤层气地震勘探技术、煤层气经济高效开采方法等诸多方面的基础理论及应用基础问题,涵盖面相当广泛,是一项很有意义的系统科学工程。项目首席科学家让我为该套丛书作序,欣然应命,特写以下文字,以示支持和祝贺。

煤层气是一种重要的非常规天然气资源。美国在 20 世纪 80 年代实现了对煤层气的商业性开发利用,建立起具有相当规模的煤层气产业。中国是个煤炭资源大国,煤层气资源也相当丰富。据最新预测结果,全国煤田埋深 2000m 以浅范围内,拥有的煤层气资源量为 $31 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (褐煤未包括在内),与我国陆上常规天然气资源量大致相当;若将褐煤中的煤层气也计算在内,数量则更加可观。从我国化石能源资源的禀赋条件和经济社会发展需求来看,煤层气是继煤炭、石油、天然气之后我国在新世纪最现实的接替能源;同时开发利用煤层气在解除煤矿瓦斯灾害隐患、保护大气环境方面也具有十分重要的作用。

我国从 20 世纪 80 年代开始进行现代煤层气技术研究及开发试验工作,截至 2004 年上半年,在全国境内已施工各类煤层气井近 250 口,建成柳林、潘庄、大城、淮南等 10 余个煤层气开发试验井组,其中阜新刘家、晋城潘庄、沁水柿庄 3 个井组已进行商业性煤层气生产;在煤储层特征研究、煤层气资源评价等基础研究以及无烟煤煤层气开发等方面也取得了可喜的进展。但总体上说,我国煤层气产业化进程缓慢,不能满足国民经济和社会发展的需要。

煤层气不同于常规天然气。它在地球化学特征、储集性能、成藏机制、流动机理、气井产量动态等方面与常规天然气有明显差别,必须要用不同于常规油气的理论和方法来指导煤层气的勘探与开发。同时,由于中国大陆是由几大板块经多次碰撞、拼合而成,至今仍受欧亚、印度、太平洋三大板块运动的共同作用影响;中国的聚煤期多、延续时间长,煤田遭受的后期改造次数多、作用强烈,因而铸就了中国煤层气地质条件的复杂性和多样性。因此,在北美单一大陆板块环境下产生的美国煤层气理论不完全适应中国的情况。

建立符合中国地质特征的煤层气基础理论,为形成中国煤层气产业提供科学技术支撑,是中国科技工作者面临的紧迫任务。经过各方面的共同努力,

在国家科学技术部的支持下,国家 973 计划“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”项目,汇集我国石油、煤炭、中国科学院和高等院校等行业和部门的专家学者及精英们协同攻关,体现了多学科交叉、产学研相结合的科学研究新理念,改变了过去部门条块分割、单一学科推进的被动局面。

项目紧紧围绕国家目标和关键科学问题,组织各方面力量,就制约我国煤层气产业化的主要科学问题,如煤层气的成因、储集性能、成藏动力学、气藏成因类型、资源富集规律及潜力、煤储层特征的地球物理响应、气体流动与产出机理等,高起点地开展了广泛、深入的基础研究,这些成果对我国煤层气产业的形成和发展具有理论指导和技术导向作用,集中代表了当前我国煤层气基础研究的整体水平。

将研究成果及时整理出版,可展示我国煤层气基础研究的实力,是加强学术交流、传播煤层气知识、加快科学研究成果向现实生产力转化的重要环节。新的科学理论和技术方法,必将加快我国煤层气产业化进程,并对世界煤层气的发展做出贡献。让我们大家共同努力,早日实现我国煤层气的跨越式发展,以满足经济社会发展对洁净能源不断增长的需求。

中国科学院院士



2004 年 8 月于北京

序 二

煤层气,俗称瓦斯,是以吸附态赋存于煤层中的一种自生自储式非常规天然气。开发和利用煤层气是一举两得的事,不仅可作常规油气的补充资源,更重要的是能够大大改善煤矿安全生产条件,减少以至杜绝煤矿事故发生。

煤层气作为一种资源量巨大的非常规天然气资源,已经从研究逐渐走向开发利用。美国是最早进行煤层气开发利用的国家,煤层气工业起步于20世纪70年代,到80年代实现了大规模的商业开发,煤层气的产量增长速度快,从1980年的年产不足 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 到1990年年产 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$,90年代初期稳产在 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$,2002年年产 $450 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占美国天然气当年产量的7.9%,可见美国煤层气的开发是相当成功的,比较成功的盆地为科罗拉多州和新墨西哥州的圣胡安盆地和亚拉巴马州的黑勇士盆地。一般认为煤层气井低产,但也有相当高产的,例如1996年,我考察圣胡安盆地ARCO公司辖区,有110口煤层气井,日产气 $660 \times 10^4 \text{ m}^3$ 多。因此研究煤层气低产中的高产规律有重要的理论与实践意义。澳大利亚借鉴美国的成功经验,也开展煤层气的勘探和试验,取得一定的成效。此外,捷克、波兰、比利时、英国、俄罗斯、加拿大等国也都开展煤层气的勘探开发试验。目前,世界上对煤层气研究日益加深,开发地域日益扩大,煤层气在能源中的地位日益提高。

我国是煤炭资源大国,拥有相当丰富的煤层气资源(据“七五”估算,埋深2000m以浅的资源量为 $31 \times 10^{12} \text{ m}^3$)。我国煤层气的勘探开发明显落后于美国,从80年代开始,积极引进美国的煤层气开采技术,进行勘探开发试验,但总的来说成效不大,主要原因是我国煤层气地质条件复杂,对煤层气藏形成机理还不太清楚,煤层气的勘探和开采与常规天然气又有很大差别,缺少较为完善和成熟的理论指导。因此,在我国进行煤层气的勘探与开发基础理论研究将是推动该产业更快向前发展的前提,回顾20年前“煤成气的开发研究”国家重点科技攻关项目的进行,促进了我国目前天然气工业的大好局面就是一个实证。我曾和其他科学家一同向国家科技部呼吁过立项进行煤层气的研究,今天这一愿望终于实现,“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”正式立项实施了,这是一件可喜可贺的大事,通过该项目的研究,将会解决我国煤层气勘探与开发存在的若干重大问题,深化煤层气成藏和开采机理的认识,催生煤层气勘探大好局面早日到来。

本人有幸加入该项目的跟踪专家行列,从立项到研究启动,一直在关注着

其进展和研究成果。迄今,项目前期的成果显著,不乏新发现、新认识和新观点以及创新。宋岩、张新民两位首席科学家计划在项目研究期内出版 11 卷《煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书》(以下简称《丛书》),《丛书》包含煤层气勘探和开发各个方面成果,主要包括前期调研论文集《煤层气成藏机制及经济开采理论基础》,和集成各个课题的和项目的研究成果。《丛书》从煤层气形成的动力学过程及资源贡献、煤储层物性非均质性及控制机理、煤层的吸附特征与储气机理、煤层气藏动力学条件研究、煤层气成藏条件和模式、我国煤层气可采资源潜力评价、煤层气藏高分辨率探测的地球物理响应、煤层气开采基础理论研究、煤层气开发技术等方面,系统全面地研究煤层气的勘探开发理论,技术、方法等诸多基础性、关键性问题,这是前人未及的一个重要举措。《丛书》总的主线是形成一套系统的、具有中国特色的煤层气勘探与开发理论,这也是我国目前所缺乏的。首席科学家所作出的努力和宗旨意在把我国煤层气研究优秀的成果充分展现给地学和煤层气领域学者,达到互相学习交流的目的。《丛书》是该领域中的知识积累、规律总结和创新结晶。这套丛书的出版将对从事煤层气工作的学者、相关专业人员和大中专院校学生大有裨益,同时,势必对煤层气产业产生重要影响和促进。

《丛书》的主编和作者主要是中青年科研骨干,项目给了他们用武之地,他们年富力强,知识广博,勤于实践,善于探索,勇于攀登,敢于创新,是一支强有力的生力军,故由他们编著的《丛书》基础扎实,知识丰富。

在此预祝《煤层气成藏机制及经济开采基础研究丛书》顺利陆续出版,并成为煤层气理论和实践双全的文献。

中国科学院院士



2004 年 8 月 1 日

目 录

序一	贾承造 (i)
序二	戴金星 (iii)
第一章 煤层气吸附、解吸机理研究	1
一、煤层气产出特征分析	1
(一) 煤层气产出基本特征	1
(二) 煤层气产出机理分析	1
二、AST-1000 型大样量等温吸附、解吸实验仪研制	2
(一) 设备研制概述	2
(二) 实验设备	3
(三) 样品制备	4
(四) 实验方法	4
三、煤层气等温吸附、解吸实验	7
(一) 实验原理	7
(二) 实验过程	8
(三) 实验结果分析	13
四、煤层气解吸动力学特征及解吸行为研究	26
(一) 煤层气解吸动力学特征分析	26
(二) 煤层气解吸行为实验	29
五、煤层气吸附、解吸机理	32
(一) 煤基质结构	32
(二) 煤基质与气体分子的相互作用	39
(三) 煤层气吸附、解吸机理分析	61
第二章 煤岩多孔介质渗流特性研究	72
一、煤层气渗流的影响因素分析	72
(一) 基本实验方法	72
(二) 渗流条件实验	73
二、多孔煤介质中煤层气渗流实验	75
(一) 渗流实验方法	75
(二) 煤样样柱渗流实验	75
三、煤储层渗透率现场测试分析	77
四、多孔煤介质中煤层气渗流规律及机理分析	78
五、煤储层自调节效应的概念模型和数学模型	79
第三章 沁水盆地地质特征、储层精细描述和煤层气潜力评价	83
一、区域地质条件	83

(一) 沁水盆地概况	83
(二) 区域地质与构造演化	83
二、煤层气地质特征	85
(一) 含气地层及分布	85
(二) 大地构造背景	87
(三) 岩浆活动	87
(四) 区域构造形成与演化	88
(五) 水文地质特征分析	88
(六) 应力分析	89
三、煤层赋存规律及煤岩煤质特征	90
(一) 煤层空间展布规律	90
(二) 煤岩煤质	97
(三) 煤层变质程度	100
(四) 煤层埋深	105
(五) 主力含煤层的顶底板岩性	108
四、煤储层特征及精细描述	112
(一) 煤储层孔渗性	112
(二) 煤的孔隙结构	118
(三) 煤的吸附性	122
(四) 煤的含气性	127
(五) 煤储层压力	134
(六) 煤层气饱和度	137
(七) 煤储层温度	141
五、煤层气勘探开发现状	141
(一) 煤层气资源分布	141
(二) 勘探开发现状及开发潜力评价	142
(三) 煤层气勘探开发技术	143
第四章 煤层气开采储层数值模拟模型建立及软件开发	146
一、煤储层渗透率理论模型研究	146
二、煤储层气、水两相耦合流动数学模型建立	148
(一) 基本假设	148
(二) 裂隙系统中气、水相流动方程	148
(三) 基质系统中解吸扩散方程	149
(四) 定解条件	149
三、数值模型及求解	150
(一) 全隐式解法	152
(二) 全隐式线性差分方程组的建立及求解	156
四、软件开发	162
(一) 软件控制流程	164

(二) 软件结构 165

(三) 开发模块 167

(四) 程序结构图 167

(五) 软件接口 174

(六) 操作界面开发 175

(七) 软件功能 183

五、储层数值模拟技术在煤层气勘探开发中的应用 183

 (一) 沁南煤层气藏单井生产数值模拟分析 183

 (二) 沁南煤层气藏开发方式优选 187

 (三) 井网开采井间距对产能的影响 189

参考文献..... 211

第一章 煤层气吸附、解吸机理研究

一、煤层气产出特征分析

(一) 煤层气产出基本特征

煤层气作为一种新型的洁净能源,其开发利用对将来能源的补充来说是至关重要的。而煤层气的产出具有其特殊性。从煤层气的产出角度分析,其过程大致可分为三个阶段。

第一阶段(饱和水流机制):大部分煤层在静水压力作用下是被水饱和的,处于平衡状态,甲烷吸附在煤孔隙表面。如果通过煤层气井对煤层流体进行抽放,就能打破这一平衡。抽放的第一阶段产出水,为水单相流阶段。

第二阶段(非稳态流机制或不饱和水流机制):继续抽水进一步降低储层压力,降至解吸压力之下时,甲烷就不断地从煤体孔隙表面解吸,在孔隙或裂隙的水中形成气泡,但这些气泡没有合并成气流,它对水的流动有一定的阻碍作用,使水的相对渗透率下降。

第三阶段(两相流机制):随储层压力继续下降,更多的气体解吸出来,气饱和度增加,直到气泡合并成连续气流,并运移到钻孔中产出,气的相对渗透率逐渐增加。

(二) 煤层气产出机理分析

煤层气主要是以吸附状态赋存于煤基质的孔隙中,在一定压力下处于动平衡状态,其产出机理遵循“解吸—扩散—渗流”的过程,即:从煤基质孔隙表面解吸,通过基块和微孔隙扩散到裂隙中,以达西流方式经裂隙流向井筒三个过程。

煤层气在煤基质孔隙表面解吸和吸附是完全可逆过程。当储层压力降低时,被吸附的甲烷分子从煤的内表面脱离,解吸出来进入游离相。解吸是煤层气开发的先决条件,因此这一过程至关重要。

解吸的煤层甲烷需要经孔隙或微裂隙扩散到裂隙中,才能形成达西流流向井筒。煤层甲烷的扩散是甲烷分子从高浓度向低浓度区的运动过程,本质是气体分子不规则热运动的结果。

扩散至煤层裂隙系统的煤层气和煤层中的水产生了混相流动,沿煤层裂隙系统的降压方向渗流运移至井筒采出地面。该过程符合达西定律。渗透率是决定储层气、水流动的主要因素。同时裂隙发育状况、压差、储层损害也对煤层甲烷渗流产生影响。

煤层甲烷的产出受解吸—扩散—渗流过程的控制,三个环节紧密相连,相互影响,相互制约,任一过程受制,都将严重影响煤层甲烷的产出。

影响解吸的因素主要是压力、含气量、煤的水分含量、煤屑粒度、温度等;影响甲烷扩散的因素主要是甲烷浓度、扩散距离、平均自由程和煤层孔隙分布等;而影响渗流的因素

有渗透率、裂隙发育状况、压差和储层损坏等。

渗流是解吸发生的前提,有了渗流,才有压降,降压之后才有解吸;在压力梯度下的渗流造成了通道中甲烷分子的浓度差,然后才有在浓度差下的扩散,煤才能快速地释放其吸附的气体。同时,解吸会引起基块收缩,增大裂隙宽度,提高煤层渗透率,有利于甲烷的渗流。扩散在解吸与渗流之间起着桥梁的作用,畅通的渗流加速扩散的进行,而甲烷的快速扩散促进解吸的发生。

二、AST-1000 型大样量等温吸附、解吸实验仪研制

自主研制了 AST-1000 型大样量等温吸附、解吸实验仪,改进完成了 AST-2000 型大样量煤层气等温吸附、解吸仿真实验仪。

(一) 设备研制概述

20 世纪 80 年代之前,我国煤炭工业界以煤炭科学研究总院抚顺分院和重庆分院为核心进行煤层瓦斯吸附的实验研究,研制适应于煤矿开采瓦斯监测的“瓦斯吸附仪”与现场“瓦斯解吸仪”。装置受客观条件的限制,实验精度和实验压力不能达到对煤储层条件的模拟。

20 世纪 90 年代,国内有关研究机构陆续从美国的 TerraTek 公司(ST-100)与 RavenRideg Resource 公司引进煤层气等温吸附仪。近年来的使用发现,进口的吸附仪在实验时存在着同样的缺陷:一是实验样品量少,很难具有代表性;二是样品重复实验再现性差;三是实验条件与原生煤在储层状态下的压力与温度环境差别较大;四是煤量较小而压力传感器的精度问题直接导致实验系统误差增大。为了克服以上问题,需要研制新的试验设备。

AST-1000 型大样量煤层气等温吸附、解吸实验仪已自主成功研制,该设备具有实验精度较高、性能稳定、逼近储层条件、易于操作等特点(表 1.1),现已完成了 19 个人工煤样的分析测试;2006 年我们又进一步吸收 TerraTek 与 RavenRideg Resource 吸附仪的优点,研制了改型设备 AST-2000 型大样量煤层气等温吸附、解吸仿真实验仪,该仪器已配合井下专门钻机采样器投入实验室样品分析使用,开展了 3 个原始柱状煤样的测试分析。

表 1.1 大样量等温吸附、解吸实验装置与小样量等温吸附仪性能比较

项 目	小样量等温吸附仪	大样量等温吸附、解吸实验装置
样品缸容积	20cm ³	1000~2000cm ³
参照缸容积	20cm ³	1000~2000cm ³
样品质量	25~60g	1250~2500g
平衡水实验影响因素	多	少
系统误差	大	小
样品粒度的可变性	60~80 目	粒度可变
仿真程度	差	接近
恒温过程	快	慢

(二) 实验设备

AST-1000 型大样量煤层气等温吸附、解吸仿真实验仪。

为解决实验条件问题,针对煤层气解吸机理实验思路和目前国内外煤层气吸附、解吸实验所存在的缺陷,本课题有关人员研制了 AST-1000 型大样量煤层气吸附、解吸仿真实验装置,并于 2004 年就开始投入煤层气吸附、解吸样品的实验研究,借助本设备完成课题的相关研究工作。整套设备在以往等温吸附仪的基础上进行改进,大样量煤层气吸附、解吸仿真实验装置结构及工作原理如图 1.1 所示。

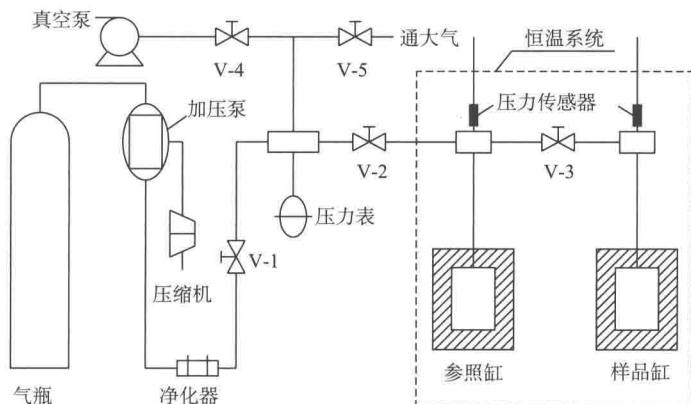


图 1.1 等温吸附、解吸实验装置结构示意图

该仪器分为以下五大系统。

(1) 主机控制系统

主机控制系统由仪器控制平台等组成,全部为不锈钢结构,控制阀由管路互相连通,控制各工作系统联结。装有样品缸和参照缸(图 1.1)。样品缸和参照缸委托航天飞行器研究所采用国家航空航天二类压力容器与相应设备制造标准制造。样品缸和参照缸的设计压力为 25MPa,实际可承受压力 37.5MPa。

(2) 恒温系统

实验中随着不断的加压,温度的微小变化会引起气体密度很大波动,从而引起气体压力的波动,因此恒温箱的控温精度是影响实验准确程度的重要因素。根据实验要求,采用恒温精度高于 0.2~0.5℃的恒温箱作为吸附、解吸实验的恒温装置,对吸附、解吸样品缸和实验参照缸(图 1.1)进行温度控制。

(3) 测量计量系统

由性能优良的传感器组成,并通过 A/D 转换系统实现温度和压力实时监测与控制。用以测量样品缸气体压力和参照缸吸附平衡压力以及甲烷吸附、解吸量。

(4) 高压供气系统

高压供气系统具有安全(满足 15MPa 最高实验压力需要)、灵便、密封性能良好的特点。由高压甲烷气(99.95%)钢瓶和加压设备等组成。

(5) 真空系统

真空系统由真空泵、真空计、管路等组成,用于控制实验过程中样品的起始真空状态。

(三) 样品制备

1. 样品类别

- 1) 无灰干燥基煤样(粒度 60~80 目);
- 2) 平衡水分煤样(粒度 60~80 目);
- 3) 炭化煤样与活化煤样(粒度 60~80 目);
- 4) 柱状原煤样(垂直层理、斜交层理、平行层理)。

2. 具体煤种

1) 晋城地区煤($C_2b-P_1^2$ 煤系)

无烟煤(WYM): 寺河煤矿、成庄煤矿 3 号煤层;

贫煤(PM): 长平煤矿 3 号煤层。

2) 韩城地区煤($C_2b-P_1^2$ 煤系)

贫煤(PM): 桑树坪煤矿 5 号、11 号煤层;

瘦煤(SM): 象山煤矿 3 号、5-2 号煤层,下峪口煤矿 2 号、3 号煤层。

3) 河东地区煤($C_2b-P_1^2$ 煤系)

焦煤(JM): 柳林 4 号煤层。

4) 黄陵地区煤(J_2y 煤系)

长焰煤(CYM): 黄陵矿业公司二号井 4-2 号煤层。

5) 其他地区煤

长焰煤(CYM): 陕北福利煤矿 2-2 号煤层(J_2y 煤系);

长焰煤(CYM): 新疆阜康;

褐煤(HM): 吉林珥春。

以上煤样皆根据推荐性国家标准加工为 60~80 目,分别进行平衡水处理与无灰干燥基同时进行等温吸附、解吸实验,其中韩城地区煤样 4 个与 ST-100 设备进行对比分析,寺河 WYM 进行炭化、活化后与原煤进行对比分析,黄陵煤样进行柱状原煤的对比分析。主要煤样都进行了工业分析。

(四) 实验方法

煤对甲烷的等温吸附、解吸实验主要由三大部分组成:一是平衡水分含量测试,二是等温吸附、解吸实验,三是数据处理。

1. 平衡水分含量的定义及测试方法

随着煤层气勘探开发工作的深入,人们逐渐意识到煤的吸附实验条件应该模拟地下储层条件,包括在吸附实验之前对所用煤样进行处理,使其达到水分平衡状态,这是因为人们认识到,煤中水的存在会对吸附量产生很大影响。

一般按存在状态把煤中的水分为外在水分、内在水分和化合水,也有的称为表面水(或自由水)、吸收水(或湿存水分)、结晶水(或结合水)。储层条件下,几乎所有的煤层都含有水,钱凯按存在状态把储层条件下的水分为自由水、分解水和化合水,自由水存在于裂隙和大孔隙内,分解水和含氧官能团通过氢键结合,水化合物附着在无机矿物和黏土上。在地下储层条件下,其实还有少量的气态水和吸附水,见图 1.2。

水的存在可能通过两方面影响煤对气体的吸附,一是部分自由水和分解水通过润湿作用和煤表面相结合,相应减小了煤吸附气体的有效面积,导致吸附量的降低;二是在自由水不能达到的小孔隙内,由于水有一定的蒸气压,有少量的水分子以气体状态存在于煤小孔隙中。水分子具有极性,与煤分子之间存在较强的 van der Waals 力,因此水分子与煤的结合比甲烷更为紧密,这些气态水分子将和甲烷在同一活性点中心展开竞争吸附,因此水的存在将对煤吸附气体产生重要影响。尤其对低煤阶煤,这种现象更为明显。为了客观地反映煤的吸附能力,等温吸附实验条件应该尽量模拟煤的地下储层条件,即地下储层温度、储层压力、含水情况等,使测试结果逼近实际、更具可靠性。由于储层温度、储层压力通常可在试井过程中获得,所以等温吸附实验所遇到的主要问题是储层条件下煤中水分的恢复。目前的解决方法是:首先使煤样中的水分达到平衡水分含量状态,然后进行等温吸附实验。

煤层气领域,煤的平衡水分含量(M_e)的定义是:60~80 目的煤样,在温度 30℃、相对湿度 96%条件下(利用饱和 K_2SO_4 溶液),煤中孔隙达到饱和吸水状态时的含水量即称为平衡水分含量。它和国际标准的 Moisture-Holding Capacity、美国 ASTM 的 Equilibrium Moisture、我国国家标准的最高内在水分(MHC)的定义一致,测试原理相同但方法有差异。严格来讲,储层条件下煤层中充满了水,而平衡水分含量测试仅仅相当于恢复了分解水、化合水、吸附水,而自由水在 30℃、96%相对湿度条件下并不能得到恢复。同时,在地下储层温度、压力条件下,自由水和煤的作用机理以及对煤层气吸附的影响等情况,目前的认识还很模糊,这也将是今后研究的一个重点。人为省略掉自由水对煤层气储集特征的影响是缺乏科学依据的,尽管如此,平衡水分煤样比干燥煤样显然更接近于实际情况,故以此作为目前普遍采用的处理方法。项目所有实验所用煤样都先经过平衡水分含量的测试,然后进行吸附实验。

平衡水分含量测试方法如下:

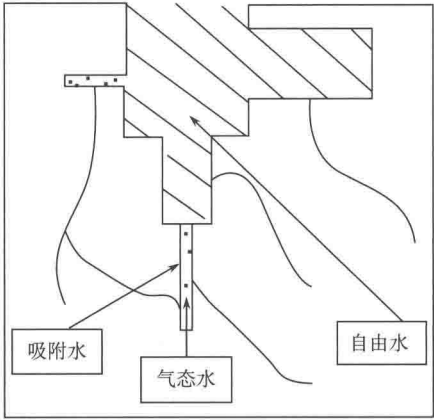


图 1.2 煤孔裂隙中自由水、气态水和吸附水示意图

准确称取空气干燥基煤样 900~1000g (精确到 0.01mg), 分别置于玻璃烧杯中, 加入一定量蒸馏水或储层水使煤样全部淹没为止, 并充分搅拌。煤样在室温下浸泡 2 小时, 然后倾入有定性滤纸的过滤器中, 用真空泵缓慢抽出多余水分。将湿煤样连同滤纸放在定质量的卫生纸上, 置入装有饱和 K_2SO_4 溶液的真空干燥器中, 抽真空密封。每隔 24 小时, 称量一次重量, 直到相邻两次重量变化不超过试样量的 3%, 即认为达到水分平衡。实验过程中, 真空过滤器置于恒温水浴中, 保持 30℃ 恒温 (因为饱和 K_2SO_4 溶液在 30℃ 时的湿度为 96%)。以平衡后的湿煤样为基准, 把所增加的水分占总湿样的质量百分数称为湿度 D , 则有

$$D = (G_2 - G_1) / G_2 \times 100\% \quad (1.1)$$

式中, G_1 为平衡前样品质量 (空气干燥基煤的质量); G_2 为平衡后样品质量 (湿煤样质量); D 为平衡后增加水分量占湿样百分数 (或湿度)。

D 是增加水分占平衡后湿样的百分数, 因为是用空气干燥基煤样进行实验, 所以 D 不包括空气干燥基中的原有水分。如果要得到平衡水分状态下煤样所包含的总水分量 (即平衡水分), 可通过上式来计算。如果是利用干燥基煤样进行平衡水分含量的测试, 得到的湿度就是平衡水分含量。对于低变质煤样, 达到湿度平衡还要视其表面残留水分的多少和湿煤粒分散程度而定。一般平衡时间大约需 4~5 天 (如果平衡水分计算有误, 可在实验结束后称重并烘干进行)。

2. 等温吸附实验方法

(1) 体积实验

目的是测试煤样的真实体积和密度, 即不包括所有孔隙的煤样体积和密度。测试温度限定在 20~25℃, 测试气体为氦气。测试时, 先抽真空使压力达到实验要求 (一般压力小于 0.004MPa), 关闭参考缸和样品缸之间的阀门, 向参考缸中充入氦气并达到设计压力 (2.6~2.8MPa)。然后打开阀门, 气体从参考缸进入样品缸, 直至气体压力稳定, 同时记录平衡前后气体的压力、温度值。体积实验后, 根据记录的数据, 利用真实气体状态方程计算出煤样的真实体积和密度。再用样品缸体积减去煤样体积, 计算出样品缸内的自由空间体积或死体积。自由空间体积包括样品缸装入煤样后颗粒与颗粒之间的空隙、煤样颗粒内部微细空隙、样品缸剩余的自由空间、连接管线和阀门内部空间的体积之总和。它是计算吸附量时所必需的参数。

(2) 压力实验

体积实验完成后需要检查系统的气密性。方法是向系统中充入氦气, 压力超过实验要求的最高压力 (或储层压力), 保证接下来的整个等温吸附实验在密封条件下进行。之后调节温度达到实验设定温度。

(3) 吸附实验

温度达到实验要求并且确定系统密封不漏气, 方可进行吸附实验。

系统先抽真空, 压力低于 0.004MPa。关闭样品缸阀门, 向参考缸内充入测试气体,